

Textilbewehrter Beton als Torsionsverstärkung*

Frank Schladitz¹, Manfred Curbach²

Zusammenfassung: Anhand von Versuchsergebnissen wird gezeigt, dass Stahlbetonbauteile mit textilbewehrtem Beton verstärkt werden können. Sowohl die Torsionstragfähigkeit als auch die Gebrauchstauglichkeit werden durch die textilbewehrte Verstärkungsschicht deutlich verbessert. Vergleichsrechnungen zeigen, dass die Torsionstragfähigkeit mit bereits bekannten Stabwerksmodellen ermittelt werden kann.

Summary: Test results show that reinforced concrete elements can be strengthened with textile reinforced concrete (TRC). The torsional resistance and the serviceability are improved clearly by the strengthening with TRC. Comparative calculations show that the torsional resistance can be determined with already well-known strut and tie models.

1 Einleitung

Bauteile aus Stahlbeton werden neben Biegung, Querkraft und Normalkraft u. a. auch durch Torsion beansprucht. Erste experimentelle Untersuchungen von MÖRSCH [1] zur Torsionstragfähigkeit von runden Betonbauteilen im Jahr 1908 wurden durch umfangreiche Versuche von GRAF / MÖRSCH [2] an runden und rechteckigen Beton- und Stahlbetonbauteilen im Jahr 1922 ergänzt. Ergebnisse dieser frühen Untersuchungen zeigten bereits, dass zur Sicherstellung der Torsionstragfähigkeit im gerissenen Zustand (Zustand II) eine Wendelbewehrung oder eine Längs- und Bügelbewehrung, die über die gesamte Bauteillänge angeordnet wird, notwendig ist. Mit der Wendelbewehrung wurden höhere Torsionstragfähigkeiten erreicht.

Spätere Untersuchungen von LEONHARDT / SCHELLING [3] bestätigten die o. g. Ergebnisse und stellten deutlich heraus, dass durch die ausschließliche Anordnung von Längs- oder Bügelbewehrung im gerissenen Zustand keine Torsionsmomente aufgenommen werden können.

* Dies ist eine begutachtete Veröffentlichung./This is a peer-reviewed paper.

Online verfügbar/Online available: [urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244048995744-78708](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244048995744-78708)

¹ M.Sc., Institut für Massivbau, TU Dresden

² Prof. Dr.-Ing., Institut für Massivbau, TU Dresden

Das Torsionstragverhalten eines Stahlbetonbauteils im ungerissenen Zustand (Zustand I) kann u. a. mit der Saint-Venantschen Torsionstheorie, die bereits Mitte des 19. Jahrhundert aufgestellt wurde, beschrieben werden, siehe z. B. KURRER [4]. Für die Beschreibung des Tragverhaltens im gerissenen Zustand wurde erstmalig von RAUSCH [5] im Jahr 1929 eine Fachwerktheorie aufgestellt.

Aus Gründen der Umnutzung von Bauwerken, der Erhöhung von Belastungen oder auch der Instandsetzung von Konstruktionen besteht immer häufiger die Notwendigkeit, das Tragverhalten von bestehenden Stahlbetonbauteilen zu verbessern. Bis heute werden diese Verbesserungen häufig durch eine Verstärkung mit einer zusätzlichen Schicht aus Stahlbeton realisiert. Neben dieser Methode wurden ab den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts Stahllaschen zur Verstärkung verwendet, die ab den 90er Jahren immer mehr durch CFK-Lamellen und CFK-Gelege (sheets) verdrängt wurden, siehe z. B. KLEES [6].

Mit der Verbreitung der CFK-Produkte erfolgten auch umfangreiche Untersuchungen zur Torsionsverstärkung mit CFK-Gelegen, siehe z. B. GHOBARAH ET AL. [7] und SALOM ET AL. [8]. Die Resultate dieser Untersuchungen zeigten, dass die Torsionstragfähigkeit vorzugsweise mit einer ganzflächigen Ummantelung (Bild 1a) oder einer Ummantelung mit Streifen im 45°-Winkel (Bild 1b) gesteigert werden kann.

Auf Grund dieser Erkenntnisse und der im Rahmen eines Forschungsprojektes, FRANZKE ET AL. [9], gewonnenen Versuchsergebnisse zur Steigerung der Torsionstragfähigkeit mit Textilbeton schien eine Torsionsverstärkung von Bauteilen mit textilbewehrtem Beton sehr sinnvoll. Textilbeton kann im Gegensatz zu CFK-Gelegen sowohl Zug- als auch Druckkräfte übertragen und ist durch die ganzflächige Anordnung der textilen Bewehrung im Winkel von $\pm 45^\circ$ auch für wechselnde Beanspruchungsrichtungen geeignet. Die erwarteten Traglaststeigerungen konnten bereits durch erste eigene Versuchsergebnisse an rechteckigen und runden Probekörpern bestätigt werden.

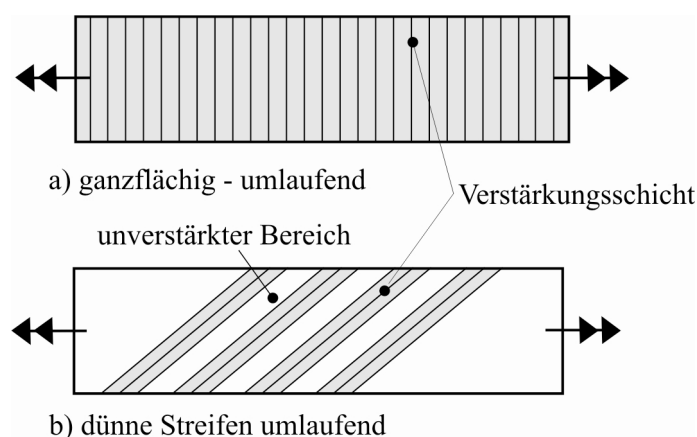


Bild 1: Beispiel für eine Verstärkung mit CFK

Fig. 1: Example of a strengthening with CFRP

Die in ersten Versuchen mit runden Probekörpern erreichten Verbesserungen der Torsionstragfähigkeit sowie die rechnerische Ermittlung der Torsionstragfähigkeit von mit Textilbeton verstärkten Bauteilen werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Probekörpergeometrie und Materialien

Die experimentellen Untersuchungen umfassen unverstärkte Referenzprobekörper sowie Probekörper mit einer Verstärkung aus Textilbeton. Die Textilbetonverstärkungen der verschiedenen Probekörper unterschieden sich sowohl in der Lagenanzahl der textilen Bewehrung als auch in den Übergreifungslängen der Textilien (Tabelle 1).

Tabelle 1: Untersuchte Probekörper

Table 1: Tested elements

Probekörper	Verstärkung	Übergreifungsbereich	Übergreifungslänge
1.1 und 1.2	Referenzprobekörper ohne Verstärkung	-	-
2.1 und 2.2	4 Lagen AR-Glas Gelege *	23 cm	32 cm
3.1 und 3.2	4 Lagen AR-Glas Gelege *	15 cm	21 cm
4.1 und 4.2	6 Lagen AR-Glas Gelege *	23 cm	32 cm

* Bezeichnung: NWM-3-003-07-p2 (15 %)

2.1.1 Stahlbetonprobekörper

Alle acht Stahlbetonprobekörper besaßen einen runden Querschnitt mit einem Durchmesser von 30 cm. Die Länge der Probekörper betrug 2,05 m (Bild 2 und Bild 3).

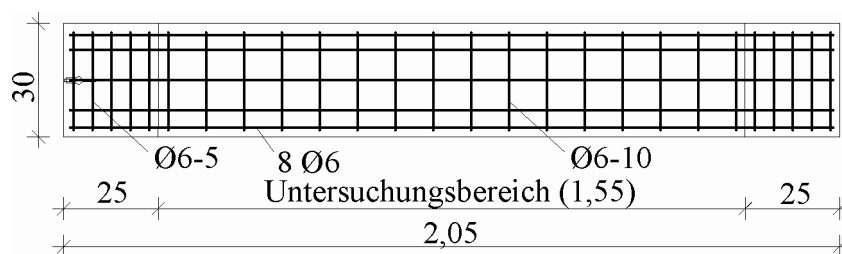
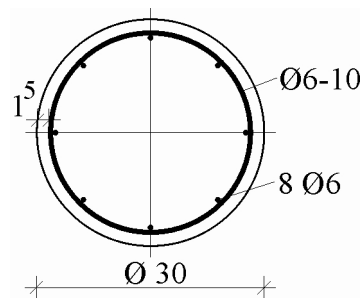


Bild 2: Längsschnitt

Fig. 2: Longitudinal section

**Bild 3:** Querschnitte im Prüffeld**Fig. 3:** Cross section in the test range

Die Stahlbügel- und Stahllängsbewehrung wurden so gewählt, dass ein plötzliches Versagen beim Übergang vom Zustand I zum Zustand II verhindert werden konnte und im Prüffeld ein Zugstrebenwinkel θ von 45° vorhanden war. Im Auflagerbereich und im Bereich der Lasteinleitung erfolgte eine Verdichtung der Bügelbewehrung.

Für den Beton wurde eine Festigkeitsklasse C20/25 gewählt. Dieser Beton hat eine niedrige Zugfestigkeit und stellt somit einen frühzeitigen Übergang vom ungerissenen in den gerissenen Zustand sicher. Gleichzeitig besitzt der Beton eine Druckfestigkeit, mit der die Tragfähigkeit der Betondruckstreben deutlich über der der Stahlzugstreben liegt und somit ein Versagen der Bewehrung provoziert werden konnte.

Die Beton- und Stahleigenschaften sind den Tabellen 2 und 3 zu entnehmen. Die Ermittlung der Betondruck- sowie der Spaltzugfestigkeit erfolgte an Würfeln (150/150/150 mm) und die des E-Moduls an Zylindern ($\varnothing 150 / 300$ mm). Die Prüfungen wurden nach DIN 1048-5 durchgeführt.

Tabelle 2: Betoneigenschaften**Table 2:** Material properties of concrete

Probekörper	Betondruckfestigkeit nach 28d [N/mm ²]	Betondruckfestigkeit am Prüftag [N/mm ²]	Spaltzugfestigkeit nach 28d [N/mm ²]	E-Modul nach 28d [N/mm ²]
1.1	33,2	34,9	2,64	26.300
1.2	33,2	33,9	2,64	26.300
2.1	34,9	36,3	2,82	29.400
2.2	34,9	39,4	2,82	29.400
3.1	32,1	35,8	2,73	25.300
3.2	32,1	34,7	2,73	25.300
4.1	28,9	30,6	2,46	25.400
4.2	28,9	30,5	2,46	25.400

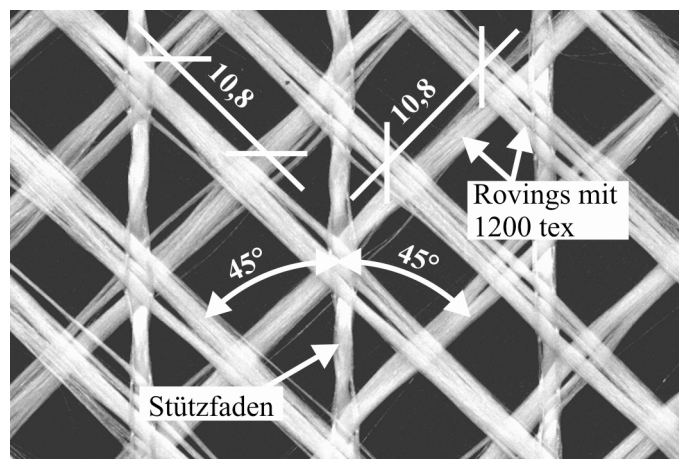
Tabelle 3: Stahleigenschaften**Table 3:** Material properties of steel reinforcement

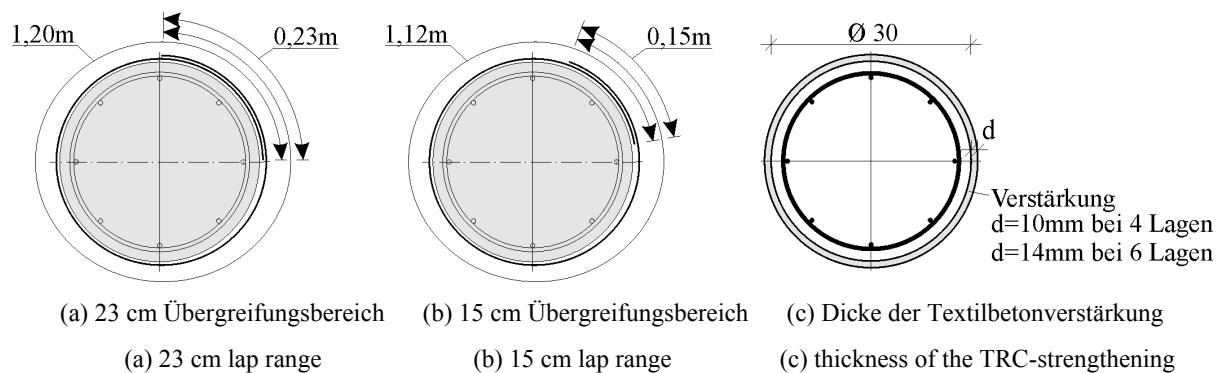
Eigenschaften	
Durchmesser [mm]	6
Querschnittsfläche [mm ²]	28,3
Streckgrenze [N/mm ²]	546
Zugfestigkeit [N/mm ²]	628
E-Modul [N/mm ²]	207.744

2.1.2 Verstärkung

Die Verstärkungsschicht bestand aus einem Feinbeton mit einer textilen Bewehrung. Der Feinbeton war eine Mischung aus Zement CEM III, Zuschlägen mit einem Größtkorn von 1 mm, Steinkohlenflugasche, Microsilica und Fließmittel (JESSE [10]). Die Betondruckfestigkeit des Feinbetons betrug 70 N/mm² und die Biegezugfestigkeit 5 N/mm². Beide Werte wurden an Prismen (160/40/40 mm) nach DIN EN 196 ermittelt.

Als textile Bewehrung wurde ein Gelege aus AR-Glas (Bild 4) verwendet, welches ein Flächengewicht von 263 g/m² hat. Die verwendeten Rovings besaßen eine Feinheit von 1200 tex (1.200 g/km) und wurden mit einem Winkel von $\pm 45^\circ$ in einem Abstand von 10,8 mm angeordnet. Ein Stützfaden in Längsrichtung des Geleges erhöhte die Formstabilität. Die Zugfestigkeit des Geleges im einaxialen Dehnkörperversuch nach JESSE [10] betrug 790 N/mm².

**Bild 4:** Gelege der Verstärkung**Fig. 4:** Textile fabric of the strengthening

**Bild 5:** Anordnung der Verstärkung**Fig. 5:** Arrangement of the strengthening

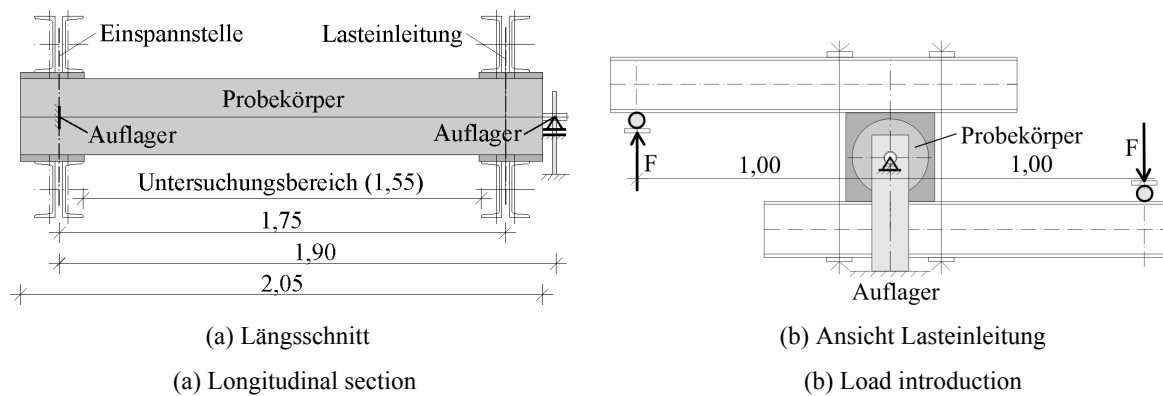
Die Textilbetonverstärkung wurde über die gesamte Bauteillänge angeordnet. Nach dem Sandstrahlen und Vornässen der Oberfläche des Stahlbetongrundkörpers erfolgte das Auftragen des Feinbetons und des textilen Geleges. Um den Einfluss der Textilmenge auf das Tragverhalten zu untersuchen, wurden sowohl die Lagenanzahl als auch die Übergreifungslängen variiert. Ein vorzeitiges Versagen der Übergreifungsstöße sollte durch die Wahl von Übergreifungslängen, die deutlich über denen aus Verankerungsversuchen von LORENZ / ORTLEPP [11], abgeschätzten Übergreifungslängen (7 cm) liegen, verhindert werden (siehe Tabelle 1 und Bild 5a, b). Durch das im 45° Winkel angeordnete Textil ergibt sich z. B. bei einer Länge des Übergreifungsbereichs von 23 cm eine Übergreifungslänge in Faserrichtung von 32 cm (23 cm x 1,41). Die Übergreifungsbereiche wurden versetzt angeordnet. Die Dicke der Verstärkungsschicht betrug 10 mm bei vier Lagen und 14 mm bei sechs Lagen textiler Bewehrung (siehe Bild 5c).

2.2 Versuchsaufbau

Die Probekörper wurden in einem Versuchsstand geprüft, mit dem es möglich ist, eine reine Torsionsbelastung einzuleiten. Durch zwei gegenläufige Pressen mit gleichgroßer Pressenkraft konnten eine Querkraft- und eine Biegebeanspruchung weitgehend ausgeschlossen werden. Die Probekörper wurden im Bereich der Lasteinleitung drehbar gelagert und am anderen Ende fest eingespannt. Die Bilder 6 und 7 zeigen den Versuchsstand.

Die Stützweite der Probekörper betrug 1,90 m, die Einspannstelle und die Lasteinleitung waren im Abstand von 1,75 m angeordnet und das Prüffeld besaß eine lichte Weite von 1,55 m.

Um beim Versuch die Verformungen des Probekörpers zu messen, befanden sich neben mehreren Wegaufnehmern und Dehnmessstreifen auch Messmarken für die photogrammetrische Auswertung und ein Neigungsmesser am Probekörper.

**Bild 6:** System des Versuchsstandes**Fig. 6:** Test setup**Bild 7:** Foto des Versuchsstandes**Fig. 7:** Photograph of the torsion test setup

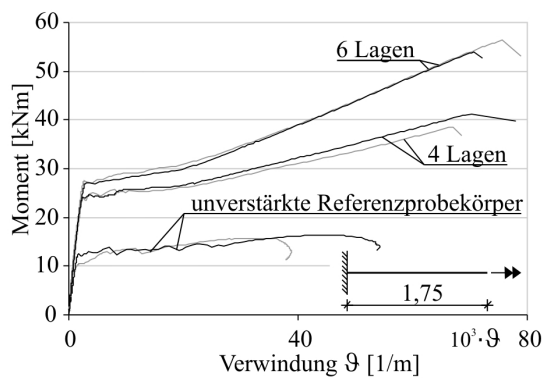
2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Experimente zeigen, dass die verstärkten Probekörper eine höhere Tragfähigkeit als die unverstärkten Probekörper aufweisen. Mit zunehmender Lagenanzahl der textilen Bewehrung steigt die Tragfähigkeit (Tabelle 4).

Im Vergleich mit den unverstärkten Probekörpern begannen die sichtbare Rissbildung und der Übergang in den Zustand II bei den verstärkten Probekörpern bei wesentlich größeren Torsionsmomenten. Es ist zu erkennen, dass oberhalb des Erstrissmomentes bei gleichem Torsionsmoment die Verwindung mit zunehmenden Textillagen abnimmt (Bild 8a).

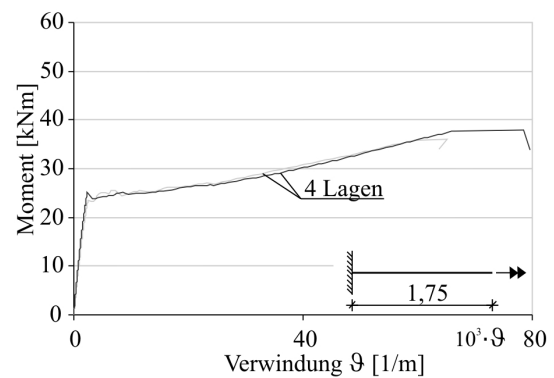
Tabelle 4: Bruchmomente und Traglaststeigerungen**Table 3:** Failure load and load increase

Probekörper	Bruchmoment [kNm]	Ø Bruchmoment [kNm]	Traglaststeigerung [%]
1.1	15,75	16,10	Referenz
1.2	16,43		
2.1	38,74	40,09	148
2.2	41,43		
3.1	36,10	36,95	126
3.2	37,80		
4.1	55,88	54,95	240
4.2	54,01		



(a) Verstärkung mit 23 cm Übergreifungsbereich

(a) TRC-strengthening with 23 cm lap range



(b) Verstärkung mit 15 cm Übergreifungsbereich

(b) TRC-strengthening with 15 cm lap range

Bild 8: Momenten-Verwindungs-Abhängigkeit**Fig. 8:** Torque-twist dependency

Bei gleicher Lagenanzahl haben die Probekörper mit einer Übergreifungslänge von 23 cm eine höhere Torsionstragfähigkeit als die mit einer Übergreifungslänge von 15 cm (Vergleiche Bild 8a und 8b).

3 Vergleichsrechnung

Die im Versuch ermittelten Tragfähigkeiten lassen sich mit den bekannten Stabwerksmodellen (z. B. nach DIN 1045-1) für die Torsionsbeanspruchung nachvollziehen. Mit einem

Stabwerksmodell, welches senkrecht aufeinander stehende Zugstreben besitzt, kann die Tragfähigkeit des Stahlbetonbauteils (Bild 9a) bestimmt werden.

$$T_{Rm,s} = \min \left\{ \frac{2 \cdot A_{ks} \cdot \frac{A_{sl}}{u_{ks}} \cdot f_{ym,sl} \cdot \tan \theta}{2 \cdot A_{ks} \cdot \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{ym,w} \cdot \cot \theta} \right. \quad (1)$$

mit	$T_{Rm,s}$	mittleres aufnehmbares Torsionsmoment (Stahlbeton)
	A_{ks}	Kernfläche der Stahllängsbewehrung
	u_{ks}	Umfang der Kernfläche A_{ks}
	A_{sl}	Querschnittsfläche der Torsionslängsbewehrung
	A_{sw}	Querschnittsfläche der Bügelbewehrung
	s_w	Abstand der Bügelbewehrung
	$f_{ym,sl}$	mittlere Streckgrenze der Stahllängsbewehrung
	$f_{ym,w}$	mittlere Streckgrenze der Bügelbewehrung
	θ	Druckstrebenwinkel (siehe Bild 9)

Die Tragfähigkeit der Textilbetonverstärkung wird mit einem weiteren Stabwerksmodell (Bild 9b), welches wendelförmig umlaufende Zugstreben besitzt, ermittelt. Für die Vergleichsrechnung berücksichtigt der Faktor $k_{\Delta lt}$ die erhöhte Tragfähigkeit der Verstärkung durch die Mehrmenge des Textils im Übergreifungsbereich.

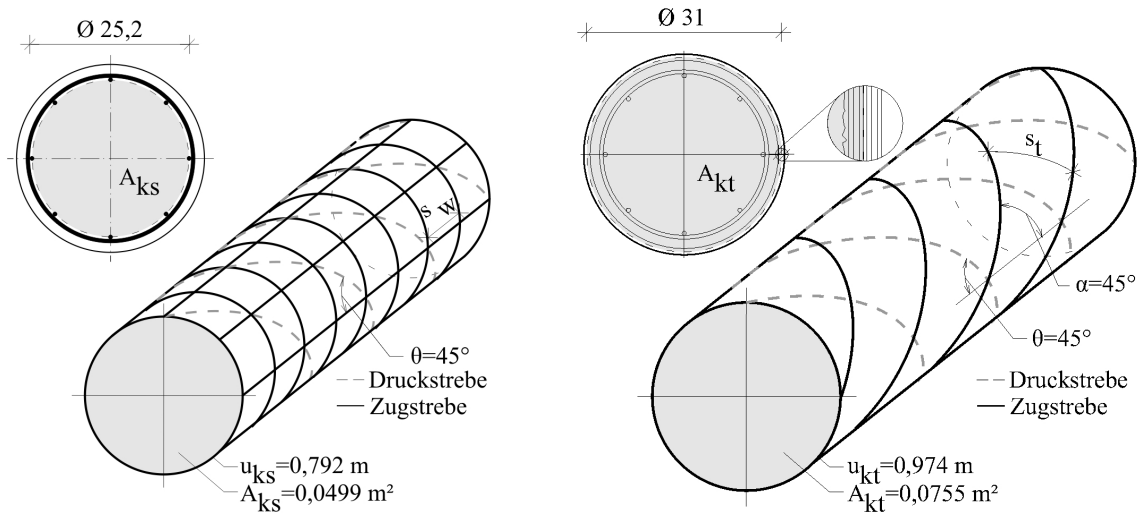
$$T_{Rm,t} = 2 \cdot A_{kt} \cdot \frac{A_t}{s_t / \sin \alpha} \cdot f_{tm} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \cdot k_{\Delta lt} \quad (2)$$

mit	$T_{Rm,t}$	mittleres aufnehmbares Torsionsmoment (Textilbeton)
	A_{kt}	Kernfläche der Textilbewehrung
	A_t	Querschnittsfläche der Textilbewehrung
	s_t	Abstand der Rovings
	f_{tm}	mittlere Zugfestigkeit der textilen Bewehrung
	θ	Druckstrebenwinkel (siehe Bild 9)
	α	Winkel der Bewehrung (siehe Bild 9)

Der Faktor $k_{\Delta lt}$ für die Mehrmenge des Textils im Übergreifungsbereich ergibt sich durch folgendes Verhältnis.

$$k_{\Delta lt} = \frac{(u_{kt} + l_{t,vorh} - l_{t,erf})}{u_{kt}} \quad (3)$$

mit	$k_{\Delta lt}$	Faktor für die Mehrmenge des Textils im Übergreifungsbereich
	u_{kt}	Umfang der Kernfläche A_{kt}
	$l_{t,vorh}$	vorhandener Übergreifungsbereich des Textils
	$l_{t,erf}$	erforderlicher Übergreifungsbereich des Textils

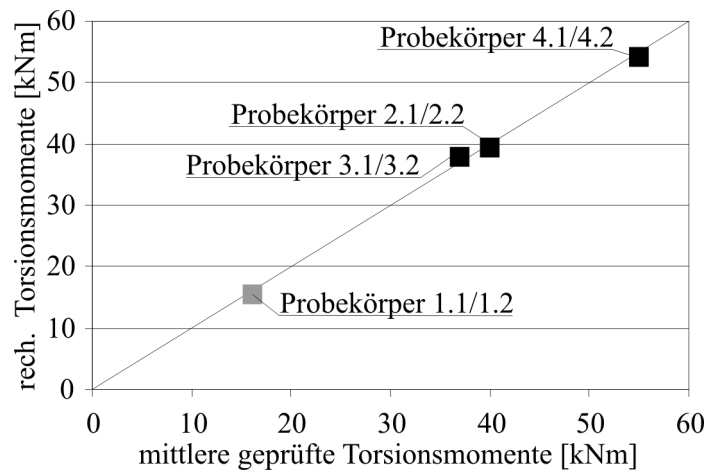


(a) Altbeton und Stahlbewehrung

(b) Textilbetonverstärkung mit 4 Lagen Textil

(a) existing concrete and steel reinforcement

(b) TRC-strengthening with 4 layers of fabric

Bild 9: Stabwerksmodelle**Fig. 9:** Strut and tie models**Bild 10:** Ergebnisse der Vergleichsrechnung**Fig. 10:** Comparison of calculated versus experimental torsional resistance

Die Gesamttragfähigkeit ergibt sich aus der Addition beider Modelle.

$$T_{Rm} = T_{Rm,s} + T_{Rm,t} \quad (4)$$

mit T_{Rm} mittleres aufnehmbares Torsionsmoment (Gesamt)

Das Bild 10 zeigt den Vergleich der berechneten und der im Versuch ermittelten Torsionstragfähigkeiten.

3.1 Beispiel

Die Ermittlung der Gesamttragfähigkeit wird am Beispiel eines mit vier Textillagen verstärkten Stahlbetonprobekörpers (Probekörper 3) gezeigt.

$$\cot \theta = \sqrt{\frac{A_{sl} / u_{ks} \cdot f_{ym,sl}}{A_{sw} / s_w \cdot f_{ym,sw}}}$$

$$\cot \theta = \sqrt{\frac{226,4 \text{ mm}^2 / 0,792 \text{ m} \cdot 549 \text{ N/mm}^2}{28,3 \text{ mm}^2 / 0,10 \text{ m} \cdot 549 \text{ N/mm}^2}} = 1,005 \quad \theta = 44,86^\circ$$

$$T_{Rm,s} = \min \left\{ \frac{2 \cdot 0,0499 \text{ m}^2 \cdot \frac{226,2 \text{ mm}^2}{0,792 \text{ m}} \cdot 549 \text{ N/mm}^2 \cdot \tan 44,86}{2 \cdot 0,0499 \text{ m}^2 \cdot \frac{28,3 \text{ mm}^2}{0,10 \text{ m}} \cdot 549 \text{ N/mm}^2 \cdot \cot 44,86} \right\} = \min \left\{ \frac{15,58 \text{ kNm}}{15,58 \text{ kNm}} \right\} = 15,58 \text{ kNm}$$

$$k_{\Delta lt} = \frac{(0,97 + 0,15 - 0,05)}{0,97} = 1,10$$

$$T_{Rm,t} = 2 \cdot 0,0755 \text{ m}^2 \cdot \frac{4 \cdot 0,465 \text{ mm}^2}{10,8 \text{ mm} / \sin 45} \cdot 790 \text{ N/mm}^2 \cdot (\cot 45 + \cot 45) \cdot \sin 45 \cdot 1,10$$

$$T_{Rm,t} = 22,60 \text{ kNm}$$

$$T_{Rm} = 15,58 \text{ kNm} + 22,60 \text{ kNm} = 38,18 \text{ kNm}$$

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die in diesem Beitrag aufgeführten Ergebnisse von Versuchen an runden Probekörpern ergänzen die bereits in SCHLADITZ / CURBACH [12] veröffentlichten Versuchsergebnisse von quadratischen Probekörpern. Sowohl bei den runden als auch bei den quadratischen Probekörpern konnten durch die Verstärkung aus textilbewehrtem Beton deutliche Steigerungen der Torsionstragfähigkeit erreicht werden. Des Weiteren wurde durch diese Verstärkung, bei gleichem Lastniveau, Verringerungen der Verwindung und der Rissbreiten erreicht. Versuche mit rechteckigen Probekörpern (Seitenverhältnis $\neq 1$) und Gelegen welche eine $0/90^\circ$ Ausrichtung besitzen sind Gegenstand der laufenden Forschung.

5 Literatur

- [1] MÖRSCH, E.: *Der Eisenbeton*. 3. Aufl., Stuttgart: Verlag von Konrad Wittwer, 1908, 44 ff.
- [2] GRAF, O.; MÖRSCH, E.: *Verdrehungsversuche zur Klärung der Schubfestigkeit von Eisenbeton*. Berlin: Verlag von Konrad Wittwer, 1922
- [3] LEONHARDT, F.; SCHELLING, G.: *TORSIONSVERSUCHE AN STAHLBETONBALKEN*. Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1974
- [4] KURRER, K.: *Geschichte der Baustatik*. Berlin: Ernst & Sohn, 2002, 274 ff.
- [5] RAUSCH, E.: *Berechnung des Eisenbetons gegen Verdrehung und Abscheren*. TH Berlin: Eigenverlag, 1929 – Dissertation
- [6] KLEES, M.: *Sachstandsbericht zur Bemessung von Bauteilen mit Klebeverstärkung*. TU Kaiserslautern, 2004 – Diplomarbeit
- [7] GHOBARAH, A.; GHORBEL, M. N.; CHIDIAC, S. E.: Upgrading Torsional Resistance of Reinforced Concrete Beams Using Fiber-Reinforced Polymer. *Journal of Composites for Konstruktion* (2002), S. 257–263
- [8] SALOM, P. R.; GERGLEY, J.; YOUNG, D. T.: Torsional Strengthening of Spandrel Beams with Fiber-Reinforced Polymer Laminates. *Journal of Composites for Konstruktion* (2004), S. 157–162
- [9] FRANZKE, G.; HEMPEL, E.; ENGLER, T.; SCHIERZ, M.; BRÜCKNER, A.; PROSKE, D.; ORTLEPP, S.: Betonmastensanierung mit mehraxialen Gelegen aus alkaliresistentem Glas. *Bautechnik* 79 (2002), S. 368–374
- [10] JESSE, F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*. TU Dresden: Eigenverlag, 2004 – Dissertation
- [11] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.: Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Verankerungslänge der textilen Bewehrung in der Feinbetonmatrix. In: *Proceedings of the 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4)*, June 2009, Dresden
- [12] SCHLADITZ, F.; CURBACH, M.: Textile Reinforced Concrete (TRC) as Torsion Strengthening. In: *17th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering Congress (IABSE)*, 17.-19.09.2008, Chicago